

中国西南水梯田土壤水分特性研究 ——以哈尼梯田为例

李 源, 宋维峰, 马建刚

(西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224)

摘要: 为了研究中国西南水梯田的土壤水分特性, 以云南哈尼梯田为例, 选取哈尼梯田核心区全福庄小流域内林地、荒草地、旱地和水田 4 种土地利用类型, 分层取 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 深度土样测其主要土壤理化指标和土壤水分特征曲线, 分析其土壤的持水性和水分有效性。结果表明: (1) 哈尼梯田 4 种不同土地利用类型土壤容重变化范围为 $0.61 \sim 1.41 \text{ g/cm}^3$, 且 0—40 cm 与 40—100 cm 差异性显著, 土壤有机质含量为 $1.17\% \sim 9.65\%$; 土壤总孔隙度和非毛管孔隙度变化与容重一致, 土壤毛管孔隙度总体呈现林地 > 旱地和水田 > 荒草地; (2) 土壤质地以粉砂壤土为主, 粉粒含量最高 ($52.74\% \sim 82.55\%$), 砂粒含量次之 ($14.44\% \sim 45.31\%$), 黏粒含量极少 ($0 \sim 3.68\%$); (3) 相同土壤水吸力下, 林地各土层土壤水分特征曲线相对较高, 土壤持水性最强, 旱地和水田次之, 荒草地最低; 土壤有效水含量则表现为水田 > 林地 > 旱地 > 荒草地; (4) 影响哈尼梯田土壤水分特性的关键因素是土壤颗粒组成和毛管孔隙度, 其中土壤持水性与颗粒组成呈显著正相关, 土壤有效水含量与土壤毛管孔隙度呈显著正相关。总体而言, 哈尼梯田生态系统中林地具有良好的蓄排能力, 而梯田在保蓄水分的同时进行水分再分配, 二者在维持生态系统可持续发展上具有十分显著的作用。研究结果为进一步研究西南水梯田土壤水分和梯田灌溉管理提供了科学依据。

关键词: 哈尼梯田; 土壤水分特征曲线; 土壤持水性; 土壤水分有效性

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0160-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.02.022

Soil Moisture Characteristics of Water Terrace in Southwest China —A Case Study of Hani Terraces

LI Yuan, SONG Weifeng, MA Jiangang

(College of the Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: In order to research soil water characteristics of water terrace in southwestern China, the Hani terraces were taken for example, 4 kinds of land use types (woodland, grassland, dry land, and paddy field) in the Hani terraced fields core (Quanfuzhuang watershed) were selected, the main soil physical and chemical index, soil water characteristic curve, water holding capacity, and moisture availability were measured in 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, and 80—100 cm soil layers. The results showed that: (1) The soil bulk density varied from $0.61 \sim 1.41 \text{ g/cm}^3$, and showed significant difference between 0—40 cm and 40—100 cm, and the content of soil organic matter was $1.17\% \sim 9.65\%$. The changes of soil total porosity and non capillary porosity were consistent with bulk density, and the soil capillary porosity was woodland > dryland and paddy field > grassland. (2) The soil texture was mainly silt loam, with the highest silt content ($52.74\% \sim 82.55\%$), followed by sand content ($14.44\% \sim 45.31\%$), and clay content ($0 \sim 3.68\%$). (3) Under the same soil water suction, the soil water characteristic curve of each soil layer in woodland was relatively higher, and the soil water holding capacity was the strongest, followed by dry land and paddy field, and the lowest in grassland. Soil available water content was paddy field > woodland > dry land > grassland. (4) Soil particle composition and capillary porosity were the key factors affecting soil water characteristics in the Hani terrace. Soil water holding capacity was significantly positively correlated with

收稿日期: 2020-10-09

资助项目: 云南省基础研究重点项目“以水为核心的哈尼梯田人工湿地生态功能维持与修复研究”(202001AS070042)

第一作者: 李源(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林水文学研究。E-mail: 18562312938@163.com

通信作者: 宋维峰(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持和森林水文学研究。E-mail: songwf85@126.com

particle composition, and soil available water content was significantly positively correlated with soil capillary porosity. Generally speaking, woodland in Hani terrace ecosystem has a good capacity of storing and discharging water, while terrace can retain water and redistribute water. Both of them play a very significant role in maintaining the sustainable development of the ecosystem. The results provide a reference for further research on soil moisture and irrigation management of terrace in southwest China.

Keywords: Hani terraces; soil moisture characteristic curve; soil water retention; soil moisture availability

中国西南水梯田是一个由森林、村庄、梯田、溪流(河流)组成的山地复合型生态系统,主要分布在湖南湘西地区、广西北部地区和云贵高原山区。区域内丘陵和中低山脉广泛分布,地形复杂,其中山地占 53.55%,丘陵占 11.62%^[1-4]。这个区域也是中国坡耕地比重较大的区域,梯田不仅在该区域经济和社会发展中居于非常重要的地位,而且在改变山地水文过程、保持水土、利用山地水资源方面具有重要作用。最具代表性的有云南红河哈尼梯田、广西龙胜龙脊梯田、湖南新化紫鹊界梯田、贵州加榜梯田和贵州盘县新民梯田^[5]。西南地区水梯田具有共同的特点,即:梯田均依山而建,田块大小和形态受地形和坡度影响,表现出单块梯田面积差异明显,总体坡度与原始地形保持一致;区域内雨量充沛,但相对海拔高度差异悬殊,受小气候影响明显,垂直景观结构基本表现为“森林—村庄—梯田—河流”的格局^[6-7];梯田的灌水主要来自于上部的森林和地下水露,层层梯田将森林来水分级截流、分散蓄渗,调蓄区域内巨大的水量;同时,通过沟渠和田块间自流灌溉的方式将上游来水,分配给每一块田,使水分和营养物质在梯田内部相互传递,保证梯田的常年灌水和作物的正常生长。

以哈尼梯田为例,其垂直结构为森林—村庄—梯田—河流“四素同构”的生态系统结构,4 个子系统各自发挥着重要作用,是西南山地生态农业的典型代表(图 1)。在哈尼梯田这种独特的自流灌溉生态系统中,土壤水分作为土壤能量交换和养分循环的载体,是维持该区域生态系统水循环和水量平衡的关键因素,并在应对干旱、雨洪时发挥重要作用,具有极高的研究价值。在土壤水分运移方面,段兴凤等^[8]研究发现,哈尼梯田水源区森林土壤渗透性能较好,各林分土壤渗透性指标均大于荒坡;张小娟等^[9]利用氢氧同位素技术对哈尼梯田水源区土壤同位素特征的研究表明,不同的土地利用方式下降水入渗的机制不同;在土壤水分时空分布方面,宗路平等^[10]研究发现,梯田景观水源林区土壤水分垂直分布为“双峰型”,并分析了表层土壤水分的时空变异性特征;张娟等^[11]对哈尼梯田水源区林地土壤水分空间变异性展开研究发现,各土层土壤蓄水量均表现为雨季大于旱季,且随着土层深度的增加呈递增趋势;在土壤动态

变化方面,Ma 等^[12]基于氢氧同位素技术对哈尼梯田水源区典型植被类型的土壤水滞留时间进行研究发现,乔木林地 0—100 cm 内平均滞留时间的变化范围为 53~94 天,且随土层深度的加深而增加;李阳芳等^[13]、李静等^[14]、白艳莹等^[15]研究认为,哈尼梯田区森林具有持水能力强、入渗特性好的特点,充分发挥了森林调节水文的功能;马菁等^[16-17]研究表明,土地利用类型与土层深度的交互作用对土壤含水率的影响较大,越往深层,林地的保水效果越好。

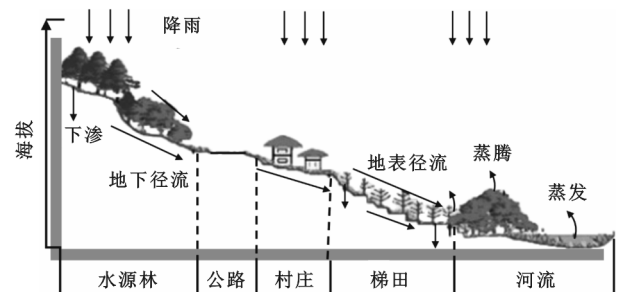


图 1 哈尼梯田生态系统空间结构示意图^[7]

迄今为止,针对哈尼梯田土壤水分的相关问题已做出大量研究,而将哈尼梯田地区林地、草地、旱地和水梯田结合起来研究土壤水分特性和空间关系的文章相对缺乏。本文以哈尼梯田核心区,全福庄小流域为研究对象,通过测定土壤含水率、机械组成、有机质和土壤水分特征曲线等性质,利用 Van-Genuchten 模型拟合哈尼梯田土壤水分特征曲线,进而分析林地、荒草地、旱地和水田 4 种土地利用类型不同深度土壤的持水特性和水分有效性,旨在反映哈尼梯田地区土壤基本理化特征与水分特性之间的联系,揭示哈尼梯田生态系统内部土壤水分空间特性,为进一步探索中国西南水梯田涵养水源的机理和土壤水分运移研究提供基础数据,也为中国西南梯田水分灌溉管理、维持机制及早改水等空间拓展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

哈尼梯田全福庄小流域位于云南省南部,红河州元阳县哈尼梯田景观核心区中部(23°05′23″—23°06′09″N,102°46′04″—102°46′39″E),小流域面积 13.92 km²(图 2)。研究区地处哀牢山脉南段,地形总趋势为南高北底,地貌以侵蚀中山地貌和河谷地貌为主,海拔 1 880~2 130 m;具有亚热带山地季风气候

的特点,冬暖夏热,多雾多雨,干湿季分明,年平均气温 16.6℃,多年平均降水量 1 500~2 000 mm,暴雨居多,年平均日照时间 1 820.8 h,年平均雾日高达 181 天。流域内土壤主要是黄棕壤和黄壤,土层较厚,砾石少,约 100 cm,土壤剖面完整;小流域内土地利用类型以林地、水田为主,其中森林覆盖率达 80% 以上,植被类型为中亚热带常绿阔叶林,主要乔木种有大叶柯(*Lithocarpus megalophyllus* Rehder et E. H. Wilson)、元江栲(*Castanopsis orthacantha* Franch.)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis* D. Don)、云南臀果木(*Pygeum henryi* Dunn)等。主要灌木树种有臭牡丹(*Clerodendrum bungeis* Steud.)、野牡丹(*Melastoma candidum* D. Don)、广西香花藤(*Aganosma Kwangsiensis* Tsiang)、茶(*Camllia sinensis* (L.) Q. Kuntze)。主要草本种有蕨菜(*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn var.*latiusculum* (Desv.) Underw.

ex Heller)、芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)、喜花草(*Eranthemum pulchellum* Andrews)、莎草(*Cyperus rotundus* L.) 等^[12-15]。样地基本情况见表 1。

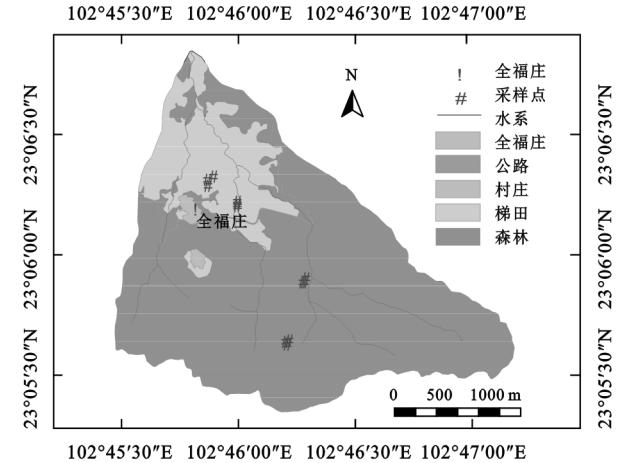


图 2 研究区地理位置

表 1 研究区样地基本情况

土地利用类型	海拔/m	主要植被类型	地理坐标		备注
			东经(E)	北纬(N)	
林地	2071.2	旱冬瓜、印度木荷、泡花树、西南山茶、元江栲等	102°46′11″	23°05′37″	捡柴、采茶等
荒草地	1953.1	芨草、龙爪芽等	102°46′16″	23°05′51″	放牧,牲畜践踏
旱地	1902.0	玉米	102°46′17″	23°05′52″	旱作梯田,水改旱
水田	1885.8	水稻	102°46′00″	23°06′05″	终年泡水,自流灌溉

1.2 样地选择与样品采集

在对全福庄小流域全面调查基础上,根据研究区主要土地利用类型的分布规律和特点(表 1),选择林地、荒草地、水田和旱地 4 种主要土地利用类型,并选择海拔和植被长势接近的 3 块典型样地作为重复样地。于 2019 年 7 月按照林地 10 m×10 m、荒草地 1 m×1 m、旱地 5 m×5 m、水田 5 m×5 m 分别布设 3 个标准样方;在每个样方内开挖 100 cm 的土壤剖面,并去除表层枯落物(水田放水后开挖),分别用容积为 100 cm³ 的环刀采集 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 共 6 个土层深度的原状土样,同时每层取 1.0 kg 的扰动土样,所有土样取 3 次重复,并密封冷藏,带回实验室。

1.3 试验方法

1.3.1 样品测定 将采集的土样带回西南林业大学土壤学实验室进行处理,各指标测定方法为土壤容重、毛管孔隙度、田间持水量采用环刀法^[18]测定;土壤有机质采用重铬酸钾法^[18]测定;土壤机械组成:将土样除去有机质和碳酸盐,加分散剂超声分散后,使用 MS3000 激光粒度分析仪^[19]测定;土壤水分特征曲线:利用压力膜仪,采用饱和脱湿的方法来得到原状土体各基质吸力对应的含水率,计算每一级压力下每个样品的土壤含水量,对 3 个样品取平均值,得出

各级压力下土壤含水量和压力的关系,并采用 Van-Genuchten 模型进行拟合^[19],即:

$$\theta(h)=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{(1+|\alpha h|^n)^m}$$
 (1)

式中: $\theta(h)$ 为土壤容积含水率(cm^3/cm^3); h 为压力水头(cm ,水柱); α 为与进气值有关的吸力值,对应于曲线的拐点; n 为与孔径分布有关的参数,对应于曲线的斜率,用于描述脱水速率; $m=1-1/n$, θ_r 为残余含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水率(cm^3/cm^3)。

1.3.2 土壤水分常数划分 基于 Van-Genuchten 模型拟合的土壤水分特征曲线方程参数和环刀法实测值,计算得到哈尼梯田地区土壤水分常数(重力流出水、全有效水、速效水、缓效水和无效水^[20])。其中,重力流出水为 0~-30 kPa 时的土壤含水率,速效水为-30~-1 000 kPa 时的土壤含水率,缓效水为-1 000~-1 500 kPa 时的土壤含水率,全有效水为速效水和缓效水的总和,无效水为低于-1 500 kPa 时的土壤含水率。

1.4 数据处理分析

采用 Excel 2016 软件进行数据计算,Origin 2018 软件绘图,利用 RETC 软件中的 Van-Genuchten 模型进行土壤水分特征曲线的参数拟合,并采用 SPSS 24.0 软件中单因素方差分析(One-way ANOVA)方法检验显

著性,Pearson 相关系数法分析相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

4 种土地利用类型土壤理化性质垂直分布的测定结果见表 2。不同土地利用类型土壤容重总体表现为荒草地(1.25 g/cm³)>旱地(1.09 g/cm³)>水田(1.00 g/cm³)>林地(0.86 g/cm³),同一土地利用类型下,上层土壤(0—40 cm)与下层土壤(40—100 cm)差异性显著($P<0.05$),且林地、荒草地(40—100 cm)和水田土壤容重随土层深度增加而增大,荒草地 0—20 cm 与 20—100 cm 各土层的土壤容重差异性显著($P<0.05$),而旱地土壤容重则呈现先增加后减小的趋势;同一土层深度下,林地土壤有机质含量明显高于荒草地、水田和旱地,且随着土层深度增加,有机质含量逐渐降低。就孔隙度而言,4 种土地利用类型的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度变化趋势与其容重相反,表现为林地、荒草地(40—100 cm)和水田随土层深度的增加呈递减的趋势,旱地 20—40,40—60 cm 土层显著高于其他土层;除林地外,不同土地利用类型各土层间土壤毛

管孔隙度的变化没有呈现出普遍的规律性,总体表现出林地>旱地和水田>荒草地。

根据美国制土壤质地分类标准^[21],研究区土壤质地以粉砂壤土为主,粉粒含量(52.74%~82.55%)最高,砂粒含量(14.44%~45.31%)次之,黏粒含量(0~3.68%)极少。不同土地利用类型各土层的土壤机械组成差异明显,总体表现为随着土层深度的增加,林地土壤砂粒含量逐渐减小(39.99%降至 14.53%),粉粒(58.98%增至 82.14%)和黏粒(1.03%增至 3.45%)含量逐渐增加,且 0—20 cm 土层黏粒含量显著小于其他土层;荒草地土壤随着土层加深,砂粒含量增加(33.35%增至 44.44%),粉粒(65.45%降至 54.55%)和黏粒(2.23%降至 0.23%)含量减少;而旱地和水田土壤粒径分布较为复杂,随土层加深并无明显规律,但二者 20—40 cm 土层土壤粉粒(80.42%和 64.25%)和黏粒(2.96%和 1.41%)含量均显著高于 10—20,40—60,60—80 cm 土层。此外,研究区林地和旱地 80—100 cm 土层土壤质地发生改变,粉粒含量极高,分别为 82.14%和 82.55%。

表 2 研究区不同土地利用类型土壤理化性质

土地利用 类型	土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质 含量/%	颗粒组成/%			总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	土壤 质地
				砂砾 (>0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)				
林地	0—10	0.65±0.01b	9.65±0.36a	39.99±1.25a	58.98±1.12d	1.03±0.24e	62.05±0.54a	41.43±1.06b	20.62±1.31a	粉砂壤土
	10—20	0.71±0.07b	8.67±0.32b	35.77±5.08ab	63.01±4.94c	1.22±0.15e	58.14±1.35a	44.91±2.07b	13.23±3.31b	粉砂壤土
	20—40	0.77±0.02b	7.99±0.34c	32.64±3.78b	65.67±3.69c	1.69±0.13d	55.04±1.01b	43.74±1.57b	11.30±1.63b	粉砂壤土
	40—60	0.93±0.10a	7.15±0.26d	22.86±0.94c	75.30±1.61b	2.36±0.20c	54.43±2.09b	45.94±0.87b	6.49±1.55c	粉砂壤土
	60—80	1.01±0.08a	4.87±0.18e	18.33±1.55cd	79.26±0.65ab	3.08±0.09b	53.18±2.44b	48.11±1.66a	4.08±4.11c	粉砂壤土
	80—100	1.09±0.01a	4.65±0.17e	14.53±1.08d	82.14±1.26a	3.45±0.07a	53.20±2.15b	49.24±0.49a	4.96±2.13c	粉砂土
荒草地	0—10	1.41±0.03a	4.11±0.15a	33.35±0.86c	62.69±1.81a	2.23±0.08a	44.59±0.94b	34.75±0.64b	5.84±1.57b	粉砂壤土
	10—20	1.36±0.06a	4.04±0.19ab	33.42±0.88c	65.45±0.72a	1.14±0.16b	32.54±2.21d	23.85±0.29c	8.69±1.25a	粉砂壤土
	20—40	1.08±0.04c	3.89±0.14b	40.74±2.74b	60.94±1.25a	0.81±0.10c	47.56±1.45a	40.30±1.39a	7.26±2.81a	粉砂壤土
	40—60	1.19±0.01b	4.00±0.14c	40.13±1.41b	56.24±2.8b	0.69±0.11cd	45.67±0.70b	39.35±2.80a	6.32±2.09a	粉砂壤土
	60—80	1.21±0.03b	2.80±0.10d	44.44±1.36a	55.24±1.28b	0.23±0.07d	39.49±1.34c	33.82±0.60b	5.67±1.90b	粉砂壤土
	80—100	1.25±0.02b	2.26±0.08e	42.12±1.92ab	54.55±3.45b	0.52±0.03e	39.70±0.79c	34.78±1.53b	4.92±2.17b	粉砂壤土
旱地	0—10	1.10±0.03b	5.09±0.18a	30.85±0.85b	70.28±1.54bc	0.00±0.00f	47.22±0.62c	39.69±0.86bc	7.53±1.43c	粉砂壤土
	10—20	1.11±0.04b	4.32±0.16b	28.51±1.90c	69.7±1.85bc	1.79±0.11c	50.38±1.66b	41.08±2.89b	9.30±1.77b	粉砂壤土
	20—40	1.11±0.03b	1.72±0.06c	16.63±0.85d	80.42±0.45a	2.96±0.45b	56.61±0.13a	45.46±0.64b	11.15±0.77b	粉砂土
	40—60	1.20±0.04a	3.46±0.12d	29.28±0.32bc	70.74±1.15b	1.08±0.12e	42.43±1.30d	24.14±1.80c	18.29±3.07a	粉砂壤土
	60—80	1.00±0.05c	1.61±0.06d	37.04±0.24a	65.28±5.05c	1.09±0.04d	51.86±2.06b	42.91±1.38b	8.95±2.20c	粉砂壤土
	80—100	1.02±0.02bc	1.17±0.04e	14.44±1.04d	82.55±1.29a	3.68±0.59a	57.25±0.43a	54.14±0.87a	3.11±0.81d	粉砂土
水田	0—10	0.61±0.11c	4.32±0.16a	23.53±1.45b	63.23±2.40a	0.00±0.00e	51.37±1.35b	34.99±1.16c	16.38±2.51a	粉砂壤土
	10—20	0.97±0.02b	4.11±0.15a	44.08±0.62a	55.45±0.42bc	0.44±0.16d	57.99±0.15a	46.69±1.22a	12.30±1.27b	粉砂壤土
	20—40	1.06±0.01b	3.89±0.14a	35.79±2.16b	64.25±0.94a	1.41±0.34b	56.29±0.30a	36.91±0.82c	19.37±1.04c	粉砂壤土
	40—60	1.12±0.13a	2.69±0.10a	39.71±2.75b	57.32±1.52b	1.06±0.04c	53.98±2.05b	48.27±1.51a	5.71±3.51cd	粉砂壤土
	60—80	1.13±0.03b	2.15±0.08b	42.53±1.20ab	57.19±0.69b	1.12±0.07bc	51.99±1.57b	43.21±1.62b	8.79±1.67c	粉砂壤土
	80—100	1.17±0.05a	2.80±0.10c	45.31±0.98a	52.74±1.21c	2.15±0.07a	47.05±0.36c	41.80±1.22b	5.25±1.11d	粉砂壤土

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一土地利用类型不同土层间的差异显著($P<0.05$)。

2.2 土壤持水性分析

土壤水分特征曲线在相同水吸力下,曲线越高,即土壤容积含水率越大,其持水能力越强,反之持水能力越弱^[22]。从图 3 可以看出,4 种土地利用类型各土层的土壤水分特征曲线在低吸力阶段(0~200 kPa)和高吸力阶段(>200 kPa)变化差异很大,具体表现为在低吸力阶段各土地利用类型土壤容积含水量随土壤水吸力的增加而迅速降低,曲线陡直;而高吸力阶段,土壤容积含水量随土壤水吸力的增加而缓慢,且趋于平行。林地土壤持水性为底层土壤(60—100 cm)>中层土壤(20—60

cm)>表层土壤(0—20 cm);荒草地土壤持水性为中层>底层>表层,其中 0—10 cm 土层土壤水分特征曲线与 80—100 cm 土层在高吸力阶段出现重合现象;旱地各土层土壤水分特征曲线分布范围较大(0.14~0.57 cm³/cm³),其持水性表现为 80—100 cm>20—40 cm>10—20 cm>0—10 cm>60—80 cm>40—60 cm;与其他 3 种 land 类型相比,水田的土壤水分特征曲线分布相对集中,且有多处交叉重合,其土壤持水性由高到低依次为 20—40 cm>80—100 cm>10—20 cm>60—80 cm>40—60 cm>0—10 cm。

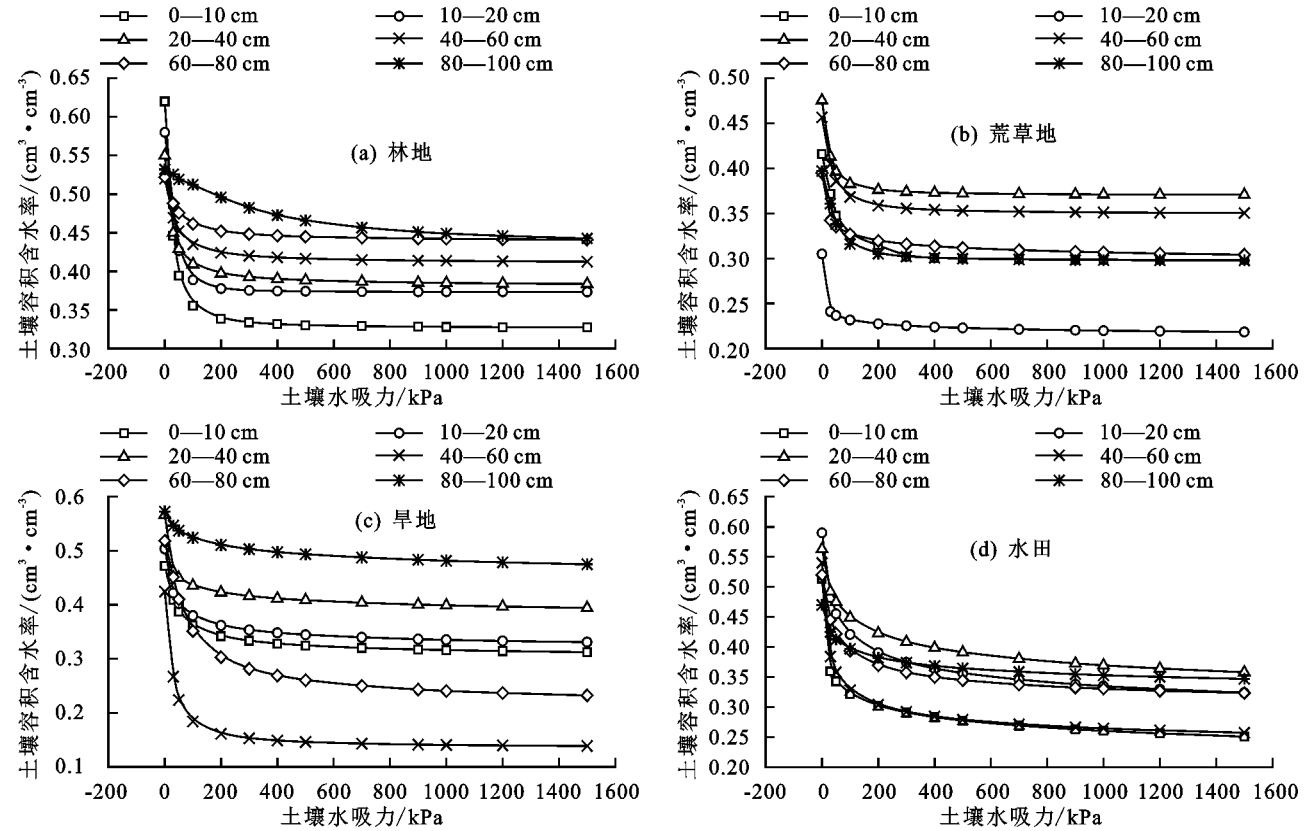


图 3 不同土地利用类型各土层土壤水分特征曲线

根据图 4 可知,不同土地利用类型相同土层土壤水分特征曲线差异也比较明显。在 0—10,10—20,20—40 cm 土层 4 种土地利用类型土壤水分特征曲线分布相对集中(除 10—20 cm 荒草地外),土壤持水性总体表现为林地和旱地稍强于水田和荒草地,其中 10—20,20—40 cm 水田土壤水分特征曲线变化趋势相对较陡,并与其他土地利用类型发生交叉现象;在 40—80 cm 土层上,土壤持水能力为林地>荒草地和水田>旱地,且旱地土壤水分特征曲线远低于其他 3 种土地利用类型;在 80—100 cm 土层上,各类型土壤水分特征曲线变化趋于一致,其中旱地和林地持水性最强,水田次之,荒草地最差。总体而言,在相同水吸力下,林地各土层土壤水分特征曲线相对较高,土壤持水性强,旱地和水田次之,荒草地最低。

2.3 土壤水分有效性分析

从表 4 可以看出,各水分常数在不同土地利用类型上存在一定差异性。其中全有效水和速效水含量变化趋势基本趋于一致,总体表现为水田最高,林地和旱地次之,荒草地最小;缓效水含量表现为:林地和荒草地显著低于旱地和水田,重力流出水和无效水含量因土地利用类型不同而规律性不同。从土地利用类型来看,林地(除 80—100 cm)土壤重力流出水和有效水含量随土层深度加深而减小,无效水含量则相反;荒草地土壤水分常数总体偏低,且各土层间差异性不大;旱地 40—80 cm 土层有效水显著高于其他土层;水田则表现为 0—10 cm 土层重力水含量最高,为 24.93%,80—100 cm 最小,为 4.44%,且整个土壤剖面上有效水含量差异性不大。从土层来看,在 0—40 cm 各土

层上,林地、旱地和水田重力流出水和全有效水含量显著高于荒草地,而林地和水田无效水含量最高,旱地次之,荒草地最小;在40—60 cm土层上,旱地重力流出水和无效水含量与其他3种土地利用类型相比

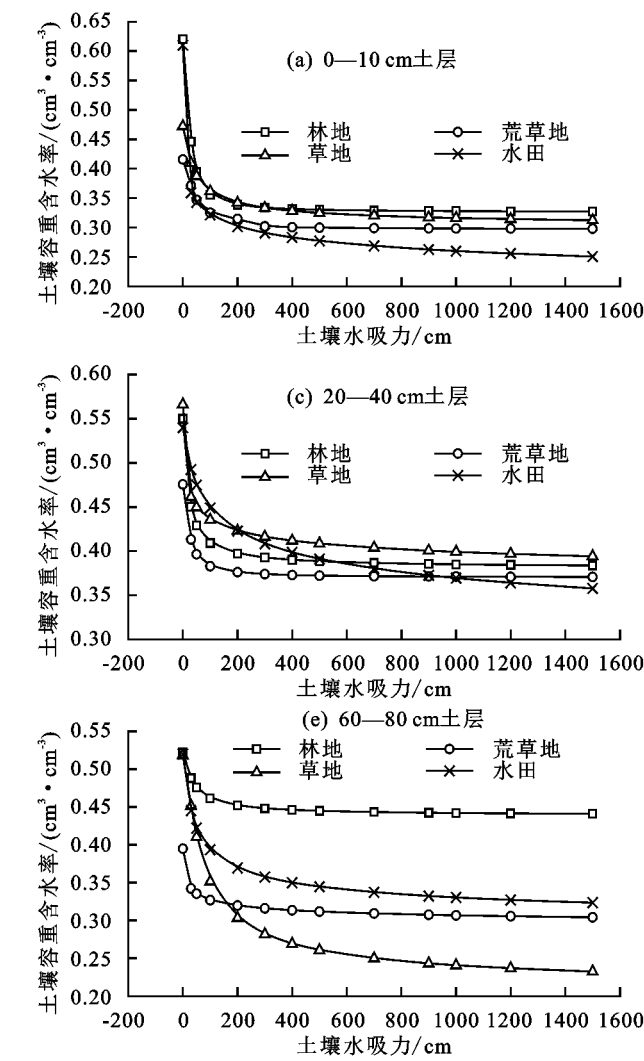


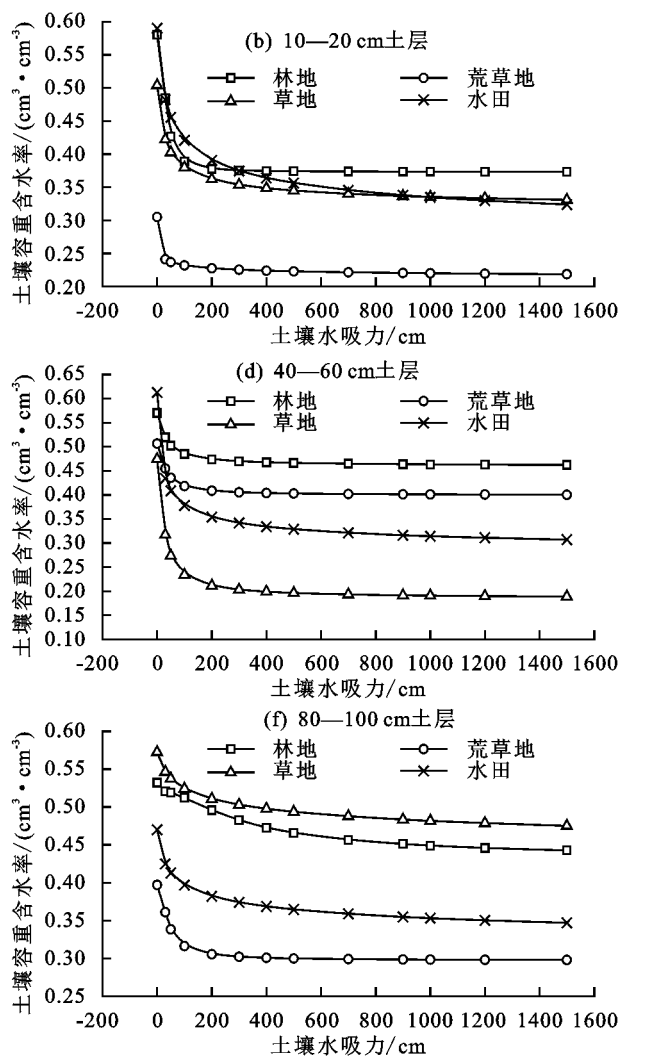
图4 同一土层不同土地利用类型土壤水分特征曲线

2.4 土壤水分特性影响因素分析

从表5可以看出,不同土壤水吸力下土壤容积含水率(θ)与土壤黏粒、粉粒和砂粒含量均有较高的相关性,与总孔隙度和有机质含量的相关性次之,与容重呈一定负相关,但其相关性不显著。当水吸力为30 kPa时,土壤持水性与容重显著负相关,相关系数为-0.423,与黏粒显著正相关,相关系数为0.513;当水吸力为50~1 500 kPa时,土壤持水特性与黏粒含量相关性达到极显著正相关($P<0.01$),与砂粒含量显著负相关;当水吸力为300~1 500 kPa时,土壤持水特性与粉粒显著正相关。由此,可以确定影响哈尼梯田地区土壤持水能力的关键因子是土壤颗粒组成,土壤黏粒、粉粒含量越大,土壤持水性越强,且黏粒含量高的土壤比砂粒含量高的土壤的持水能力强。

由表6可知,哈尼梯田分布区土壤的重力流出水含量与总孔隙度和非毛管孔隙度呈极显著正相关,与

差异性显著,旱地和水田土壤有效水含量显著高于林地和荒草地,且旱地缓效水含量最高,为3.19 cm³/cm³;在60—100 cm土层上,各立地类型土壤重力流出水和有效水含量总体差异不明显。



容重呈极显著负相关,与黏粒呈显著负相关;全有效水和速效水含量与土壤毛管孔隙含量呈显著和极显著正相关,相关系数分别为0.503和0.549,与土壤容重的相关性较好,呈一定负相关;缓效水含量与各土壤理化性质相关性不大;无效水含量与黏粒呈极显著正相关,与粉粒含量呈显著正相关,与砂粒含量呈极显著负相关。

3 讨论

3.1 土壤持水性

土壤水分特征曲线指土壤基质势随土壤含水量变化的曲线,即土壤水的能态和水量之间的关系,是分析研究土壤水分保持和运动的基本参数之一,也是研究土壤水分特性的重要曲线^[20]。对于不同的土壤,由于受到土壤质地、土地利用类型、耕作灌溉措施、植被生理需水等因素的影响,土壤持水能力存在

一定差异。本研究发现,同一土地利用类型下,林地和荒草地表层土壤持水性低于底层和中层土壤,这主要是因为林地表层土壤中根系密度大,土壤容重小($0.65\sim0.71\text{ g/cm}^3$),有机质含量高,土壤结构较为松散,土壤总孔隙度和非毛管孔隙度大,在低吸力阶段水土壤水分以重力水的形式排出,故其土壤持水能力差,这与林莎等^[23]研究结果一致,其指出表层土壤根细发达程度对土壤持水性具有较大的影响;而荒草地植被稀少,群落结构单一,土壤中砂粒含量随土层变化逐渐增多(表 2),但由于长期牲畜踩踏,导致表层土壤容重高达 $1.41,1.36\text{ g/cm}^3$,使表层土壤的紧实度和空隙状况差,土壤持水性差。就水田而言,在哈尼梯田自上而下的自流灌溉耕作模式中,灌水自上而下流向每块梯田,表层土壤中一部分粉粒和黏粒随水流流向下一块田,最终流至下游河流;另一部分随土壤毛细管向下流动,加之长期的水稻耕作,使 $0\sim20\text{ cm}$ 土壤容重显著降低,土壤结构十分松散,持水性差,而 $20\sim40\text{ cm}$ 土层土壤不断垒结,使土壤结构相对紧实,土壤粉粒、黏粒含量增多,土壤持水性增强^[24]; $80\sim100\text{ cm}$ 土层土壤持水能力最强,这是由于该土层土壤所受人为干扰较小,土壤黏

粒和粉粒含量显著高于其他土层,土壤结构和质地基本维持原土壤母质性质^[25]。哈尼梯田地区的旱地基本都是由水田退化而来,各土层土壤水分特征曲线变化趋势具有一定的相似性,均表现为 $20\sim40,80\sim100\text{ cm}$ 土层土壤持水性强于 $40\sim80\text{ cm}$ 土层。除 $40\sim80\text{ cm}$ 土层外,其他土层土壤质地和结构稍微好于水田,土壤质地比水田偏黏性,持水能力明显较水田强^[26]。总体而言,哈尼梯田地区林地土壤持水性最强,旱地和水田次之,荒草地最差,结合表 5 可以说明,影响哈尼梯田土壤持水性的关键因素是土壤颗粒组成,其中土壤持水性与黏粒含量和粉粒含量正相关,与砂粒含量和土壤容重负相关,这与方露等^[27]和宁婷等^[28]研究结果一致。吴华山等^[24]研究发现,太湖地区水稻田土壤黏粒含量为 $18.61\%\sim44.57\%$,黏粒含量对土壤持水能力有较大影响,相比之下,本研究中水田土壤黏粒含量很小($0\sim2.15\%$),土壤持水性较弱,这主要是因为哈尼梯田地区土壤质地和独特的自流灌溉模式。故在今后实际生产中,可以在水田休闲期进行蓄水、养萍、秸秆还田和灌农家肥等,增加土壤黏粒含量的同时有效避免自流灌溉中水田土壤黏粒和养分的流失。

表 4 不同土地利用类型土壤水分常数

土地利用 类型	土层 深度/cm	重力流出水/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	有效水/($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)			无效水/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)
			全有效水	速效水	缓效水	
林地	0—10	16.69±3.49Ba	12.58±3.49Aa	12.35±3.54Aa	0.23±0.05Cb	31.51±1.02Ad
	10—20	9.13±3.41Aa	11.53±3.41Ba	11.48±3.42ABa	0.05±0.01Cc	36.12±1.01Ac
	20—40	9.74±1.36Ba	6.94±1.37Bb	6.51±1.44Bb	0.42±0.07Cb	37.11±1.04Ac
	40—60	4.90±1.02Cb	5.89±1.03Bb	5.54±1.08Bb	0.35±0.06Bb	40.00±1.03Ab
	60—80	2.34±0.64Bb	4.79±0.65Cb	4.46±0.70Cb	0.33±0.06Bb	42.85±1.03Aa
	80—100	2.12±0.05Bb	8.00±0.16Aab	5.98±0.42Ab	2.02±0.36Aa	42.85±1.15Ba
荒草地	0—10	4.27±1.35Cab	6.51±1.35Ba	6.37±1.38Ba	0.14±0.03Cc	28.60±1.02Bb
	10—20	6.36±0.25Ba	2.35±0.27Cb	1.93±0.31Cb	0.41±0.06Cb	20.58±1.05Cc
	20—40	6.01±1.11Ca	4.49±1.12Bab	4.36±1.14Bab	0.13±0.02Cc	35.85±1.02Aa
	40—60	5.01±1.15BCab	5.63±1.15Bab	5.42±1.19Bab	0.21±0.04Bc	33.81±1.02Ba
	60—80	5.20±0.41Aab	3.96±0.44Cb	3.25±0.51Cb	0.71±0.10Ba	29.11±1.08Bb
	80—100	3.52±1.18Ab	6.42±1.19Aa	6.26±1.22Aa	0.16±0.03Bc	28.55±1.02Db
旱地	0—10	6.12±1.21Cc	9.96±1.26Bbc	8.86±1.40ABc	1.10±0.18Bc	29.92±1.10ABc
	10—20	8.00±1.13Abc	9.43±1.19Bc	8.16±1.33Bc	1.27±0.19Bbc	31.73±1.12Bc
	20—40	10.38±0.67Bd	7.00±0.75Bc	5.63±0.86Bd	1.37±0.19Bbc	38.02±1.14Ab
	40—60	15.21±2.74Aa	13.4±2.76Ab	12.76±2.86Ab	0.64±0.12Bc	22.61±1.05Cd
	60—80	6.61±1.94Ac	12.26±2.02Aa	10.74±2.38Aa	2.52±0.43Aa	21.77±1.20Cd
	80—100	2.57±0.46ABd	7.42±0.56Ac	5.63±0.70Ad	1.79±0.25Ab	46.04±1.19Ab
水田	0—10	24.93±0.94Aa	11.35±1.09Ab	8.77±1.28ABb	2.58±0.36aAb	23.50±1.28Cc
	10—20	10.59±1.49Aa	16.43±1.64Aa	13.35±1.93Aa	3.08±0.45Aab	30.76±1.30Bb
	20—40	17.60±1.56Ab	13.21±1.66Ab	11.19±1.87Aa	2.02±0.30Aab	24.26±1.19Bc
	40—60	4.66±0.89Ce	13.97±1.06Aab	10.78±1.33Aa	3.19±0.45Aa	34.13±1.33Ba
	60—80	7.33±1.20Ad	12.55±1.34Bb	10.59±1.55Ba	1.96±0.30Aab	30.89±1.18Bb
	80—100	4.44±0.65ABe	8.10±0.74Ac	6.41±0.88Ab	1.69±0.24Ab	33.63±1.30Cab

注:表中数据为平均值±标准差;不同大写字母表示同一土层不同土地利用类型的差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一土地利用类型不同土层的差异显著($P<0.05$)。

表 5 不同土地利用类型土壤持水性与理化性质的相关性

土壤持水性	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%
θ_{30}	-0.423 *	0.241	0.513 *	0.334	-0.360	0.387	0.365	0.238
θ_{50}	-0.334	0.161	0.565 **	0.376	-0.410 *	0.308	0.256	0.213
θ_{100}	-0.271	0.140	0.604 **	0.403	-0.449 *	0.253	0.155	0.210
θ_{300}	-0.237	0.190	0.629 **	0.413 *	-0.472 *	0.221	0.086	0.212
θ_{500}	-0.229	0.217	0.633 **	0.412 *	-0.475 *	0.211	0.074	0.208
θ_{700}	-0.224	0.234	0.634 **	0.412 *	-0.477 *	0.205	0.068	0.203
θ_{1000}	-0.219	0.251	0.636 **	0.413 *	-0.480 *	0.197	0.063	0.197
θ_{1500}	-0.212	0.267	0.637 **	0.415 *	-0.483 *	0.188	0.058	0.190

注: * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著; * * 表示在 0.01 级别(双尾)相关性极显著。下同。

表 6 不同土地利用类型土壤水分常数与理化性质的相关性

土壤水分常数	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%
重力流出水	-0.566 **	0.219	-0.408 *	-0.141	0.206	0.579 **	0.053	0.586 **
全有效水	-0.343	-0.056	-0.263	-0.175	0.248	0.326	0.503 **	0.076
速效水	-0.360	0.029	-0.293	-0.192	0.268	0.329	0.549 **	0.053
缓效水	-0.129	-0.367	-0.031	-0.032	0.062	0.175	0.104	0.137
无效水	-0.208	0.271	0.638 **	0.413 *	-0.481 *	0.184	0.058	0.186

3.2 土壤有效水

土壤有效水含量指土壤水分被有效利用的程度,可以反映土壤本身保蓄水分潜力的高低^[29]。李航等^[22]研究发现,黄土丘陵沟壑区不同植被群落 0—10 cm 土层有效水的含水量范围为 22.65%~26.80%;刘继龙等^[30]对黑龙江地区传统耕作下玉米地土壤有效水研究发现,土壤孔隙度是决定土壤水分特性的关键因素,0—60 cm 内土壤有效水含量为 13.05~17.13 cm³/cm³。本研究发现,哈尼梯田地区不同土地利用类型土壤有效水含量有差异,且不同土层间也有较大的差异,变化范围为 3.96~16.43 cm³/cm³,总体表现为水田各土层土壤水分有效性最高,林地和旱地次之,荒草地最小。同一土层下,林地 0—10 cm 土层土壤水分有效水含量最高,这是因为林地表层土壤容重较小,相对毛管孔隙度大,水分容易被植被所吸收利用^[27];荒草地各土层土壤养分状况和土壤结构均较差,毛管孔隙度较小,其有效水含量也整体偏低。水田各土层土壤有效水变化范围为 8.10~13.97 cm³/cm³,总体高于其他 3 种土地利用类型,其原因为哈尼梯田长期处于饱和状态,储存大量水分,导致土壤含水量大于田间持水量,土壤中存在大量的重力水,使土壤中的毛细管一直处于联通状态,土壤毛管孔隙度增大,进而提高土壤水分有效性^[24-26];虽然 0—40 cm 土层旱地与水田土壤性质相近,但旱地土壤有效水含量低于水田,这可能是不同作物根系吸收

利用水分的能力以及灌溉措施不同所致^[31]。本研究还发现,在 80—100 cm 土层上各土地利用类型土壤有效水含量差异性不大,基本维持在 6.42~8.10 cm³/cm³,是因为底层土壤受人干扰小,土壤质地和结构差异性不大。本研究中土壤水分有效性与砂粒含量和毛孔隙度呈正相关,与黏粒含量和容重呈负相关,这与张永旺等^[32]研究结果一致。此外,各土地利用类型土壤缓效水和无效水含量随土壤变黏而增多,而速效水含量则相反,与王修康等^[33]研究结果基本一致。今后的研究可以建立土壤有效水含量估算模型,以土壤有效水含量为指标制定水稻土壤所需灌溉水量,在满足作物正常生长的同时将剩余用水进行储蓄,以备旱季或干旱所需。

3.3 哈尼梯田土壤水分特性分析

土壤水分特性受植被、气候、地形及土壤等多重因素影响,是水分循环过程中生态系统结构与功能的综合体现^[23]。哈尼梯田生态系统的垂直空间结构是区别与其他地区农田生态系统的典型特征。在本研究中,山顶的林地表层土壤重力水含量高,为 16.69 cm³/cm³,土壤的非毛管孔隙可暂时储存一部分重力水,供水能力强;而底层土壤黏粒和粉粒含量高,持水性强,这表明林地具有很强的蓄排能力,能够有效拦蓄降水,在提升植物根系所需水分的同时增加森林生态系统水源涵养功能,为下游梯田作物正常生长提供必要的水分,维持着整个生态系统的正常运行。与汉

江平原区水稻田^[25]相比(表 7),哈尼梯田生态系统中水田的持水性低于林地,但在梯形田面的作用下,水由上阶梯田向下阶梯田运动,从而充分利用水重力作用和水稻田渗漏的特点,使水分在不同高程田间相互传递,保证作物的正常生长,进而避免水稻田水分渗漏所造成的地下水污染^[34]。唐敏等^[35]通过对比黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征发现,梯田的保水效果最强,梯田的层层拦截作用增加了雨水入渗,改善土壤水分环境。但黄土区土层深厚,地下水埋藏较深,不能及时补给水分。而本研究中水田和旱地 20—40,80—100 cm 土壤持水性较强,相当于隔水层,再加之哈尼梯田地区特殊的岩层背景,底部基岩相对密度大、透水性差^[34],进而增强梯田的保水

蓄水能力。与东北黑土区农田相比^[36-37],土壤质地黏重,土壤持水能力强且有效水含量高,但由于黑土和黑黏土的土壤过黏,土层中存在一定的不透水层,导致地表积水严重,易形成涝渍地。

综上所述,在哈尼梯田“森林—村庄—梯田—河流”生态系统垂直空间结构下,不同土地利用类型土壤水分特性,符合整体生态系统空间水分功能需求,林地表现出良好的蓄排能力,梯田具有保水、调洪和水分分配的作用,两者的结合造就了哈尼梯田特有的山地农耕生态景观。因此,在今后西南水梯田保护和建设过程中,应注重对“森林—村庄—梯田—河流”垂直空间结构的保护,不仅要加强对上游森林的保护,而且要修缮梯田,兴修水利设施,进而保证生态系统的良性循环。

表 7 典型农田生态系统土壤水分特性对比

典型农田生态系统	位置	土地利用类型	土壤基本性质	垂直空间结构	土壤水分特性
汉江平原区稻田生态系统 ^[25]	湖北省公安县	水稻田	典型人为土,土壤结构良好,以粉粒为主	高差不大,呈平面展布,无垂直变化特征	水稻田具有较强的蓄水能力,仍有部分水分以渗漏的形式流向地下水
西南山区哈尼梯田生态系统	云南省元阳县全福庄小流域	林地、草地、旱地和水田	黄壤、黄棕壤,土壤容重整体偏低,以粉粒为主	海拔落差大,土壤、植被、温度等垂直变化特征显著	森林具有较强的蓄排能力强,梯田能够保水蓄水、调节洪峰,进行水分再分配
黄土丘陵区典型梯田生态系统 ^[35]	陕西省清涧县园则沟流域	坡耕地、梯田、枣园和草地	黄绵土,土质疏松,入渗能力较强,抗蚀抗冲性差	海拔落差较大	梯田表现出良好的蓄水保墒能力,坡耕地和枣园持水能力差
东北黑土区农田生态系统 ^[36-37]	黑龙江省萝北县鹤北小流域	旱地	黑土、黑黏土,土壤黏粒含量高,可达 30%	漫岗丘陵,海拔高差不大	土壤黏重,持水性强,有效水含量高,但土层中存在不透水层,易形成涝渍地

4 结 论

(1)哈尼梯田 4 种不同土地利用类型土壤容重变化范围为 0.61~1.41 g/cm³,且 0—40 cm 与 40—100 cm 差异性显著,土壤有机质含量为 1.17%~9.65%;土壤总孔隙度和非毛管孔隙度变化与容重一致,土壤毛管孔隙度总体呈现林地>旱地和水田>荒草地。此外,研究区土壤质地以粉砂壤土为主,粉粒含量最高,砂粒次之,黏粒含量极少。

(2)影响哈尼梯田土壤持水性的主导因素是土壤颗粒组成。不同土地利用类型相同吸力下,林地和荒草地底层和中层土壤的持水能力较强,表层土壤的持水能力较差,水田和旱地 20—40,80—100cm 土壤的持水性最强。总体而言,研究区林地的持水性最大,其次是旱地和水田,荒草地的持水性最小。

(3)哈尼梯田 4 种土地利用类型不同土层土壤有效水含量均与毛管孔隙度呈正相关。在同一土层不同土地利用类型的土壤有效水含量基本均呈现水田各土层土壤水分有效性最高,林地和旱地次之,荒草地最小;同一土地利用类型下,0—10 cm 土层林地土壤水分有效水含量最高,20—80 cm 土层水田和旱地最高,80—100 cm 土层各类型土壤有效水差异性不大。

参考文献:

[1] 王清华.梯田文化论:哈尼生态农业[M].昆明:云南大学出版社,1999:11-52.

[2] 谭宁.龙脊古梯田稳定性及水循环系统研究[D].湖北 宜昌:三峡大学,2012.

[3] 许玉凤,陈宸,陈洪升.2001—2013 年云贵高原土地利用动态变化分析[J].中国水土保持,2018(11):50-54.

[4] 曹伟超,陶和平,孔博,等.利用最佳地形特征空间进行地貌形态自动识别:以西南地区为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2011(11):1376-1380.

[5] 杨崇广.元阳哈尼梯田:天人合一的农业景观[J].地理教育,2011(11):23.

[6] 段兴凤,宋维峰,曾珣,等.湖南紫鹊界梯田区森林改良土壤作用研究[J].水土保持研究,2010,17(6):127-130,136.

[7] 姚敏,崔保山.哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征[J].生态学报,2006,26(7):2115-2124.

[8] 段兴凤,宋维峰,李健,等.云南省元阳梯田水源区森林土壤入渗特性研究[J].水土保持通报,2011,31(4):47-52.

[9] 张小娟,宋维峰,吴锦奎,等.元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征[J].环境科学,2015,36(6):2102-2108.

[10] 宗路平,角媛梅,李石华,等.哈尼梯田景观水源区土壤水分时空变异性[J].生态学杂志,2015,34(6):180-189.

[11] 张娟,宋维峰,彭永刚,等.元阳梯田水源区林地土壤水分时空变异性研究[J].西北林学院学报,2014,29(2):49-53.

[12] Ma J, Song W F, Wu J K, et al. Identifying the mean residence time of soil water for different vegetation types in a water source area of the Yuanyang Terrace, southwestern China[J].Isotopes in Environmental and Health Studies,2019,55(3):272-289.

[13] 李阳芳,宋维峰,和俊,等.元阳梯田核心区不同土地利用类型土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2012,19(6):54-57.

[14] 李静,闵庆文,杨伦,等.哈尼稻作梯田系统森林雨季水源涵养能力研究:以勐龙河流域为例[J].中央民族大学学报(自然科学版),2015,24(4):48-57.

[15] 白艳莹,闵庆文,李静.哈尼梯田生态系统森林土壤水源涵养功能分析[J].水土保持研究,2016,23(2):166-170.

[16] 马菁,宋维峰.元阳梯田水源区土壤水分动态变化规律研究[J].生态科学,2016,35(2):33-43.

[17] 马菁,宋维峰,吴锦奎,等.元阳梯田水源区林地降水与土壤水同位素特征[J].水土保持学报,2016,30(2):243-248.

[18] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:266-292.

[19] 程东娟,张亚丽.土壤物理实验指导[M].北京:中国水利水电出版社,2012:94-96.

[20] 仵峰,张凯,宰松梅,等.小麦玉米秸秆掺土还田量对土壤水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(24):101-105.

[21] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:48-76.

[22] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵区沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].生态学报,2018,38(11):3889-3898.

[23] 林莎,王莉,李远航,等.青藏高原东北缘黄土区典型立地人工林分土壤水分特性研究[J].生态学报,2019,39(18):6610-6621.

[24] 吴华山,陈效民,叶民标,等.太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素[J].水土保持学报,2005,19(1):181-183,187.

[25] 张君,易军,刘目兴,等.不同水耕年限稻田土壤水分渗漏与保持特征[J].水土保持学报,2016,30(6):90-95.

[26] 蔡晨,李谷,朱建强,等.稻虾轮作模式下江汉平原土壤理化性状特征研究[J].土壤学报,2019,56(1):217-226.

[27] 方露,李晓宁,唐香君,等.岷江上游杂谷脑河流域林树下线土壤持水性及影响因素[J].水土保持研究,2018,25(5):95-102.

[28] 宁婷,郭忠升,李耀林.黄土丘陵区撂荒地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J].水土保持学报,2014,28(3):166-170.

[29] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J].生态学报,2012,32(2):538-547.

[30] 刘继龙,李佳文,周延,等.秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J].农业机械学报,2019,50(7):333-339.

[31] 吕文强,王立,党宏忠,等.黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J].水土保持学报,2015,29(6):233-240.

[32] 张永旺,王俊,屈亚潭,等.黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价[J].灌溉排水学报,2020,39(6):79-85,114.

[33] 王修康,戚兴超,刘艳丽,等.泰山山前平原三种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响[J].自然资源学报,2018,33(1):63-74.

[34] 王辉,杨小宝,田大作,等.紫鹊界梯田区不同土地利用类型土壤入渗特征研究[J].灌溉排水学报,2012,31(5):123-126,139.

[35] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.

[36] 马富亮,符素华,罗广惠.东北典型黑土区坡耕地涝渍地土壤持水性和导水性研究[J].水土保持研究,2017,24(6):222-226.

[37] 邹文秀,韩晓增,李良皓,等.黑土区不同土地利用方式土壤水分动态变化特征研究[J].水土保持学报,2009,23(2):236-239.